



Análise do Registro de Nuvens de Pontos Obtidas por SVLT e por VANT para Aplicação no Cadastro Territorial Multifinalitário

Analysis of Point Cloud Registration Obtained by TLS and UAV for Multipurpose Cadaster

Enrico Moreira Gonçalves¹, Fabio Luiz Albarici², Henrique Candido de Oliveira³ e João Carlos Brandão Reberte⁴

¹ Instituto Federal do Sul de Minas Gerais – *Campus* Inconfidentes, Inconfidentes, Brasil. E-mail. enrico.m.goncalves@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6092-8481>

² Instituto Federal do Sul de Minas Gerais – *Campus* Inconfidentes, Inconfidentes, Brasil. E-mail. fabio.albarici@ifsuldeminas.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4436-0561>

³ Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil. E-mail. hcandido@unicamp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2783-4668>

⁴ Guandalini Posicionamento, São Paulo, Brasil. E-mail. joao.reberte@guandalinibr.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4365-9932>

Recebido: 09.2023 | Aceito: 03.2024

Resumo: O Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) é um registro sistemático que abrange elementos físicos, jurídicos e econômicos das propriedades. Este registro serve como instrumento de gerenciamento para prefeituras, exigindo atualizações recorrentes. Historicamente, o cadastro tem sido documentado em planos bidimensionais, mas devido à complexidade dos centros urbanos, a adoção do cadastro tridimensional (3D), isto é, uma extensão do cadastro bidimensional que incorpora informações na dimensão vertical, torna-se crucial. Internacionalmente, países como Holanda, Bélgica, Reino Unido, entre outros, são referências na adoção da tridimensionalidade para a gestão territorial. No Brasil, o sistema de cadastro carece de regulamentação relacionada a tridimensionalidade. Mas, a alta demanda pode impulsionar os municípios a se adaptarem ao uso desse registro. Neste estudo, propõe-se uma metodologia que combina a tecnologia *LiDAR* em plataforma terrestre com o levantamento por veículo aéreo não tripulado (VANT). O objetivo é criar uma única nuvem de pontos através do registro entre duas nuvens distintas, avaliando sua precisão para subsidiar o cadastro 3D. Para avaliar os dados, realizaram-se testes numéricos confrontando a precisão do mapeamento via nuvens *LiDAR* e VANT com medidas tomadas por equipamento topográfico. Os resultados indicam que a discrepância máxima entre o mapeamento e a referência é de 11 mm, indicando que a metodologia tem potencial contributivo no CTM e para realização do cadastro 3D. Adicionalmente, o sistema de varredura a *laser* gera um produto denominado neste trabalho de "documentação virtual", que pode ser integrado ao CTM para documentar o ambiente urbano e ser disponibilizado *on-line* para a população.

Palavras-chave: Cadastro Territorial Multifinalitário. Tecnologia *LiDAR*. Registro entre Nuvens de Pontos. Documentação Virtual.

Abstract: The Multipurpose Cadaster (MC) is a systematic record that covers physical, legal, and economic elements of properties. This record serves as a management tool for city halls, requiring recurring updates. Historically, the registry has been documented in two-dimensional plans, but due to the complexity of urban centers, the adoption of three-dimensional (3D) registry, that is, an extension of the two-dimensional registry that incorporates information in the vertical dimension, becomes crucial. Internationally, countries such as the Netherlands, Belgium, United Kingdom, among others, are references in the adoption of three-dimensionality for territorial management. In Brazil, the registry system lacks regulation related to three-dimensionality. But high demand can drive municipalities to adapt to the use of this record. In this study, a methodology is proposed that combines *LiDAR* technology on a terrestrial platform with surveying by an unmanned aerial vehicle. The goal is to create a single point cloud through the registration between two distinct clouds, evaluating its accuracy to subsidize the 3D registry. To evaluate the data, numerical tests were carried out comparing the accuracy of mapping via *LiDAR* and UAV clouds with measurements taken by topographic equipment. The results indicate that the maximum discrepancy between the mapping and the reference is 11 mm, indicating that the applied methodology has potential contributory in the MC and for the realization of the 3D registry. Additionally, the *laser scanning* system generates a product called in this work "virtual documentation", which can be integrated into the MC to document the urban environment and be made available online to the population.

Keywords: Multipurpose Cadaster. *LiDAR Technology*. Point Cloud Registration. Virtual Documentation.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a administração e gerenciamento do cadastro territorial urbano é de responsabilidade exclusiva dos municípios (BRASIL, 2022; COSTA, 2001). Entretanto as prefeituras enfrentam vários desafios nessa área, como a escassez de recursos humanos e técnicos qualificados, bem como a falta de recursos financeiros (SOUZA et al., 2022). É importante ressaltar ainda, que a unidade fundamental do cadastro territorial é a parcela, e, portanto, deve ser identificada de maneira contígua e inequívoca. Ademais, é responsabilidade da administração municipal disponibilizar as informações do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) aos cidadãos, desde que sejam observadas as restrições legais em vigor (BRASIL, 2022).

Os registros de terras normalmente usam informações espaciais bidimensionais para representar unidades territoriais. No entanto, ocupações cada vez mais complexas dos centros urbanos implicam diferentes direitos a uma mesma projeção ortográfica. Dessa maneira, a importância da introdução de registros que incorporem informações tridimensionais se torna evidente (CARNEIRO; ERBA; AUGUSTO, 2012).

Na última década, tem-se observado um crescente uso, por parte das prefeituras, de levantamentos baseados em nuvens de pontos, utilizando-se das tecnologias como *LiDAR* (*Light Detection And Ranging*) e similares. Uma nuvem de pontos consiste em um grupo de pontos que são definidos em um mesmo sistema de coordenadas tridimensional. Esses pontos frequentemente são utilizados para representar um objeto ou terreno (VOSSELMAN; MAAS, 2010). As nuvens de pontos são criadas a partir do registro de imagens com informações métricas, tanto por scanners 3D quanto por processos de fotogrametria (VICENTIN, 2021). Como exemplo, cita-se o portal GeoSampa, pertencente à prefeitura de São Paulo/SP, o qual disponibiliza acesso gratuito a imagens orbitais e aéreas, incluindo nuvens de pontos *LiDAR* da cidade (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2023).

Algumas prefeituras têm utilizado estes tipos de dados para a atualização da Planta de Valores Genéricos (PVG) e para o cálculo do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU), tal como é o caso da cidade de São Paulo/SP (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2023) e Uberlândia/MG (ESTEIO, 2021). Outro exemplo é a prefeitura do Rio de Janeiro, através da Secretaria das Cidades que tem realizado trabalhos de cadastramento tridimensional em favelas, para verificar a titularidade da parcela (ITERJ, 2023). Segundo Souza e Amorim (2015) a representação tridimensional das parcelas e seus atributos passam a ser consideradas devido à dinâmica do espaço urbano. Sendo assim, em virtude do aumento da demanda por dados tridimensionais destinados à regularização urbana e cadastral, tem-se observado um crescimento na busca por soluções de baixo custo que desempenhem essa função.

Com a grande variedade de equipamentos no mercado, surge a necessidade de realizar estudos de viabilidade e confiabilidade das tecnologias emergentes disponíveis no mercado. Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), e dispositivos *LiDAR*, por exemplo, são opções, a princípio, adequadas para esse propósito, uma vez que são capazes de coletar dados e gerar nuvens de pontos que podem ser empregadas em diversas áreas do conhecimento, como arquitetura, engenharia, cultura, entre outras.

Além disso, Leslar (2015) destaca que os VANT são plataformas acessíveis em termos de custo e possuem operação simplificada, o que também se aplica a alguns dispositivos *LiDAR*. Ainda nessa perspectiva, Tommaselli (2009) observa que a Fotogrametria oferece diversas vantagens em relação aos métodos diretos de medição, uma vez que o objeto em questão não é manipulado fisicamente, a quantidade de informações obtidas é ampla, sendo possível medir superfícies de difícil acesso e a precisão pode ser ajustada às exigências do projeto. Em relação ao *LiDAR*, Wehr e Lohr (1999) discorrem que esta tecnologia abre um grande leque de perspectivas no estudo do ambiente urbano, onde é necessário conhecer tanto a projeção horizontal da área como a altura dos objetos, além de destacar a possibilidade da geração de modelos digitais do terreno e da superfície de centros urbanos. No entanto, tanto os dados *LiDAR* quanto os fotogramétricos frequentemente enfrentam desafios relacionados à oclusão, sombras e falhas resultantes da irregularidade nas nuvens de pontos geradas. Essas limitações podem ser consideradas como uma desvantagem na geração de modelos completos (LESLAR, 2015).

Dessa forma, em várias situações, a realização do mapeamento exclusivamente por meio de VANT revela-se insuficiente para a documentação e representação abrangente de uma área, não só devido à tomada

perpendicular em relação ao solo, ocultando assim regiões sob telhados, árvores, edifícios, entre outros elementos, como também em relação ao fato de que o cadastro deve necessariamente representar os limites de todas as parcelas, com a fotogrametria só é possível identificar os limites materializados. Além disso, a utilização exclusiva de dispositivos *LiDAR* em plataforma terrestre tampouco garante um resultado plenamente preciso, pois as imagens e o mapeamento são realizados ao nível do solo, omitindo-se, pois, as informações pertinentes à porção superior dos imóveis.

Contudo, o emprego do *LiDAR* em plataforma terrestre combinado ao VANT para o mapeamento da área de interesse, pode trazer resultados otimizados, uma vez que, de acordo com Martins, Mitishita e Antônio (2022) e Becker e Centeno (2016) a integração de nuvens de pontos provenientes de distintas fontes almeja a densificação de áreas com lacunas decorrentes de oclusões e discrepâncias pontuais. Do mesmo modo, Stoter (2004) apresenta uma metodologia que visa desenvolver modelos de dados com base nos registros atuais e nas tecnologias disponíveis, com o intuito de aprimorar o cadastro tridimensional, com exemplos na Holanda, Dinamarca, Noruega, Suécia, entre outros países. Çagdas e Stubkjær (2010), por sua vez, apontam o Cadastro 3D como uma tendência em ascensão. Essa tendência é impulsionada pelo aumento da complexidade no uso do solo, principalmente em áreas urbanas, devido ao avanço tecnológico e à expansão da infraestrutura tanto acima quanto abaixo da superfície (ARAÚJO, 2015; STOTER, 2004).

Com a grande demanda por dados tridimensionais urbanos, as empresas de tecnologia estão utilizando-se de equipamentos de baixo custo, com grande capacidade de processamento e armazenamento, para embarcar alta tecnologia, como exemplo *LiDAR*, para obter-se dados tridimensionais para as mais variadas aplicações. Uma delas é o cadastro territorial, onde tem-se escassez de pesquisas que relacionam o mapeamento 3D ao CTM. Neste estudo pretende-se avaliar e quantificar o registro de nuvens de pontos produzidas por tecnologias distintas de mapeamento tridimensional, visando contribuir na aplicação no CTM. Para alcançar este objetivo avaliou-se a confiabilidade e a precisão na vinculação das nuvens de pontos obtidas em nível de aquisição aéreo e terrestre. Visto que não se tem uma legislação diretamente voltada para o mapeamento 3D, analisou-se a precisão do produto resultante com base nas diretrizes estabelecidas pela Portaria 3242/2022 e pela NBR 17047/2022, que regem a criação e atualização do CTM.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Cadastro Territorial Multifinalitário, principais legislações e estado da arte.

De acordo com Vieira, Oliveira e Silva (2002), o CTM constitui-se no registro sistemático e ordenado dos elementos físicos, jurídicos e econômicos das propriedades imobiliárias, é o instrumento de controle das prefeituras e secretarias municipais, necessitando-se ainda acompanhar-se permanentemente as mudanças no panorama urbano, sofrendo constantes atualizações. Com isso, um cadastro para ser completo deve conter informações de diversas finalidades referentes a todas as parcelas territoriais que o compõem, sejam elas públicas ou privadas, urbanas ou rurais, onde as parcelas são unidades definidas por limites formais ou informais que delimitam o uso do indivíduo sobre uma extensão de terra (CARNEIRO, 2003). Pode-se então afirmar que o CTM é poderoso instrumento de promoção do município, dando visibilidade às ações e programas de governo, auxiliando-o na busca por financiamento de suas políticas públicas de prestação de serviços (GARCIA, 2007).

Assim, o CTM é reconhecido como uma ferramenta para o planejamento territorial. Ao longo do tempo, sua utilização evoluiu de uma função primariamente fiscal para incluir aspectos de gestão territorial, preservação ambiental e promoção do desenvolvimento sustentável. Em um escopo mais abrangente, a implementação do CTM oferece vantagens em termos de gestão e planejamento para entidades governamentais e para o setor privado (PAIXÃO et al., 2012). Entretanto, historicamente, o cadastro tem sido documentado em planos bidimensionais, abrangendo parcelas, objetos territoriais e direitos sobre a propriedade. No entanto, muitos desses elementos são representativos do mundo real e, assim, não estão limitados ao plano bidimensional (OLIVEIRA; FERREIRA; FARIAS, 2018). Nesse âmbito, Aien et al. (2011) afirmam que o cadastro tridimensional (3D) é crucial para o planejamento de áreas urbanas.

O direito de propriedade sempre teve uma dimensão tridimensional, como indicado no artigo 1229 do

Código Civil, que estabelece que "a propriedade do solo abrange a do espaço aéreo e subsolo correspondentes, em altura e profundidade úteis ao seu exercício, não podendo o proprietário opor-se a atividades que sejam realizadas, por terceiros, a uma altura ou profundidade tais que não tenha interesse legítimo em impedi-las". No entanto, a descrição desse alcance sempre foi feita por meio de elementos bidimensionais, devido a limitações tecnológicas. Devido à complexidade associada ao ordenamento do território, surge a necessidade de considerar também os dados tridimensionais de sua volumetria (CARNEIRO et al., 2012). Conforme observado por Araújo (2015), o cadastro 3D representa uma extensão do cadastro territorial bidimensional que incorpora informações espaciais na dimensão vertical.

O cadastro tridimensional representa, incontestavelmente, uma ferramenta de relevância significativa no entendimento e na gestão das normas em um cenário complexo de uso do solo no Brasil, particularmente em áreas urbanas, abordando os direitos e restrições inerentes a essa ocupação. Em um país onde a legalização e venda de terrenos com direitos de construção que excedem a área do terreno são práticas comuns, a definição legal da propriedade imobiliária requer uma abordagem em 3D (GUADALUPE et al., 2017). No contexto internacional, é possível identificar vários países que servem como modelos referência na adoção da tridimensionalidade para o planejamento e gestão territorial. Conforme definido por Oliveira, Ferreira e Farias (2018) esses países incluem a Holanda, Bélgica, Reino Unido, Alemanha, Eslovênia, Rússia e Austrália, onde a Holanda se destaca como pioneira na efetiva implementação do cadastro 3D.

Desde a década passada, a implementação do CTM em 3D tem sido objeto de estudo por diversos pesquisadores, incluindo Elberink (2010), Carneiro et al. (2012), Paixão et al. (2012) e Fonseca et al. (2016), mas todos concordam que é um desafio, pois há necessidade de se ter uma base de dados mínima já levantada. Assim, com o avanço da tecnologia dos levantamentos espaciais, ferramentas eficazes para o levantamento de regiões extensas, como é o caso do uso do *LiDAR*, a qual se tornou uma fonte crucial para a aquisição de dados 3D (ELBERINK, 2010). De acordo com Engman (2016), um obstáculo comum é o alto custo de se gerar modelos 3D de uma cidade. Porém, com os avanços em questões tecnológicas tanto na captura, processamento e automatização dos dados geoespaciais, a tridimensionalidade vem se demonstrando ter aplicabilidade que justifique seu custo (OLIVEIRA; FERREIRA; FARIAS, 2018). Atualmente, a tecnologia *LiDAR* está incorporada em diversas plataformas, que variam de scanners à dispositivos móveis, o que possibilita aos pesquisadores obter dados mais precisos com menor custo e, adicionalmente, capturar imagens reais de parcelas e edifícios.

Uma das características do CTM é utilizar-se de um banco de dados públicos sobre as propriedades municipais, permitindo visualização de forma gráfica e organizando-os em um sistema cartográfico preciso e de qualidade (PEREIRA, 2009). Com a isso, é necessária uma base cartográfica, a qual, tem por função o suporte para as tarefas que se desenvolvem utilizando dados espaciais. Assim, o conhecimento da qualidade desta base é de fundamental importância para o planejamento da ocupação do espaço (LAZZAROTO, 2005).

Conforme a Portaria 3242/2022 aprovada pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), em seu capítulo 2º, Art. 4º, todos os vértices das parcelas devem estar vinculadas ao sistema geodésico brasileiro, e devem ser caracterizadas em: certificada (os limites foram obtidos por apoio geodésico e com precisão de acordo com as normas e ainda, necessitam assegurar que não existe sobreposição ou lacunas entre parcelas) e as não certificadas (oriundas de base de dados existente e que não possui precisão compatível com as normas). Assim, as parcelas certificadas devem substituir as não certificadas, tornando a base de dados mais fidedigna.

Levando em consideração a relevância do CTM para a administração pública, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio do Comitê Brasileiro da Construção Civil (CB-02), aprovou no ano de 2022 a norma ABNT NBR 17047/2022, que define nacionalmente os procedimentos do levantamento cadastral territorial para registro público nos municípios em casos de usucapião, parcelamento de solo, unificação e retificação de matrícula. A NBR17047/2022 em seu item 6.4.1 estabelece que a precisão posicional planimétrica do vértice da parcela ou do imóvel urbano deve ser de 8 centímetros. A norma complementa que o controle de qualidade pode ser realizado a partir da comparação entre a medição da distância entre dois vértices com as distâncias calculadas pelas coordenadas, tendo tolerância máxima de 24 centímetros.

As diretrizes do Cadastro Territorial Multifinalitário, lançadas pelo Ministério das Cidades em 2009 (BRASIL, 2009), estabelecem que a parcela é a unidade fundamental do Cadastro, definindo-a como uma

porção contígua da superfície terrestre. Com base apenas nessa definição, pode-se argumentar que o chamado Cadastro 3D carece de fundamentação jurídica, uma vez que a definição de superfície abrange apenas duas dimensões. No entanto, é reconhecido que o ambiente urbano envolve uma série de dinâmicas regidas por outras leis, como destacado por Carneiro et al. (2012).

Dessa forma, segundo Oliveira, Ferreira e Farias (2018), é importante notar que o sistema de cadastro no Brasil carece de regulamentação específica relacionada a tridimensionalidade. Porém, ainda segundo os autores, a demanda por essa abordagem pode, em algum momento, impulsionar os municípios a se adaptarem ao uso desse sistema. A incorporação de informações tridimensionais no Cadastro não é uma tarefa simples e, portanto, requer uma análise cuidadosa dos objetivos e finalidades dessa informação. Não basta simplesmente adicionar dados de elevação para as parcelas ou edifícios. É essencial que os objetos tridimensionais estejam integrados em um modelo de Cadastro bem definido, com sistemas de referência claros.

2.2 Fotogrametria e Sistemas de varredura a LASER.

A obtenção de uma representação 3D de espaços urbanos pode ser alcançada por meio do uso da tecnologia *LiDAR*, integrada ao Sistema de Varredura *Laser* Terrestre (SVLT). Essa abordagem garante a aquisição de informações tridimensionais precisas da área de estudo (SHAN; TOTH, 2009). O sistema *LiDAR* emite e recebe pulsos de luz para realizar a varredura. Embora seja comum a utilização de um *laser* para gerar a luz nesses sistemas, diferentes tecnologias podem ser empregadas em sua concepção.

O sistema *LiDAR* integrado ao SVLT é responsável por medir as distâncias entre o emissor do pulso *laser*, que está acoplado à plataforma, e os pontos na superfície dos objetos estudados. De acordo com Shan e Toth (2009), essas medições de distância, bem como do ângulo de varredura, das posições e altitude da plataforma, e das medidas de calibração entre todos os componentes do sistema, permitem a determinação das coordenadas tridimensionais de diversos pontos. Como resultado, tem-se uma nuvem de pontos 3D.

Em projetos cartográficos, uma das aplicações do sistema de varredura *laser* consiste em gerar nuvens de pontos que representem a superfície de maneira automatizada e precisa. Esses dados podem ser utilizados em diversas aplicações, incluindo a geração de modelos tridimensionais de áreas urbanas (OLIVEIRA, 2013). Com isso, segundo Oliveira (2013) e Shan e Toth (2009), a introdução da tecnologia *LiDAR* foi um dos fatores mais impactantes para o mapeamento topográfico nas últimas décadas.

Embora a varredura por SVLT produza uma nuvem de pontos densa e precisa que representa a cena mapeada, existem desvantagens a serem consideradas, como a limitação de mobilidade, que pode resultar em oclusões na nuvem de pontos causadas por objetos na cena. Para contornar esse problema, faz-se necessário realizar varreduras de diferentes pontos de vista, o que pode aumentar significativamente o tempo e o custo do trabalho (WUTKE, 2006).

Uma alternativa para estas oclusões na nuvem de pontos, é a obtenção de modelos urbanos 3D por meio da aplicação da fotogrametria. Segundo com Wolf, Dewitt e Wilkinson (2004), a fotogrametria é uma combinação de arte, ciência e tecnologia que permite a obtenção de informações confiáveis sobre objetos e ambientes, através de medições e interpretação de fotografias e outros tipos de imagens. Coelho e Brito (2007) ressaltam que a aplicação da fotogrametria pode resultar em uma significativa redução do trabalho de levantamento de campo, além de melhorar o tempo de obtenção de dados, além extrair informações detalhadas e precisas sobre a forma, tamanho e posição de objetos e superfícies tridimensionais (LILLESAND; KIEFER, 2000).

Atualmente a aquisição das imagens é feita por VANT onde necessita-se de uma câmera calibrada, com o eixo óptico na posição vertical (SOUZA, 2019). Esta abordagem permite a obtenção de dados para a criação de modelos urbanos 3D, contribuindo para a análise e compreensão de ambientes urbanos em diversos contextos científicos e aplicados. As imagens, são sobrepostas, permitindo identificar pontos de referência comuns, conhecidos como pontos de controle, que são usados para orientar e alinhar as imagens em um sistema de coordenadas preciso.

Para a análise de dados a partir de imagens, é exigida a formulação matemática que viabilize a conversão das medições efetuadas no espaço bidimensional (2D) para o espaço tridimensional (VICENTIN, 2021). A obtenção de dados em 3D requer, no mínimo, duas imagens, e esses dados são obtidos por meio da

utilização de perspectiva, profundidade ou formulações de geometria projetiva. Ainda, de acordo com Vicentin (2021), com base na disposição relativa das imagens e nos pontos de referência identificados, empregam-se algoritmos matemáticos para o cálculo das coordenadas tridimensionais de cada ponto na superfície do objeto ou área mapeada. Esse procedimento culmina na geração de uma nuvem de pontos ou de um modelo digital tridimensional (MDT), o qual representa as características da superfície capturada.

Por fim, de acordo com Remondino e El-hakim (2011) a fotogrametria é considerada a melhor técnica para processamento de dados em imagem, sendo capaz de fornecer para qualquer aplicação desejada informações 3D precisas, com dados métricos e detalhados, com estimativas de precisão e o nível de confiabilidade do modelo.

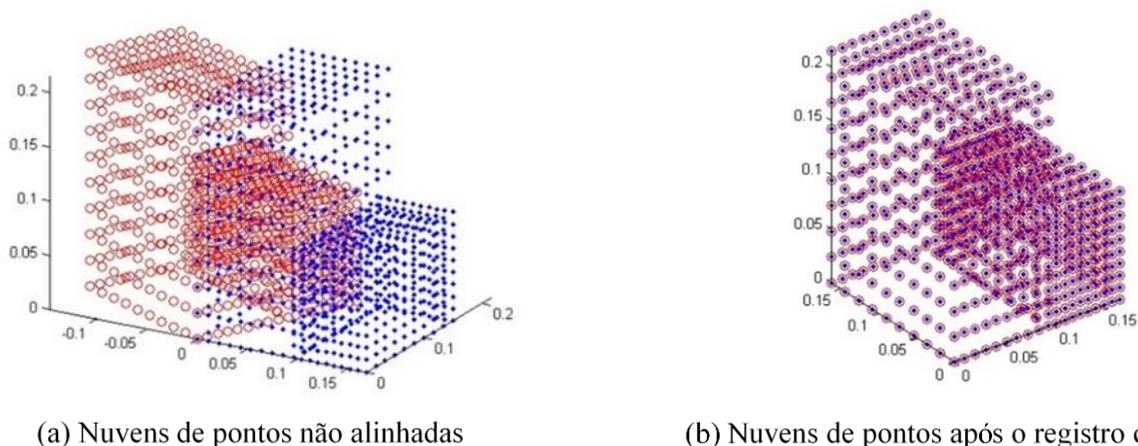
2.3 Registro entre nuvens de pontos

Embora ambas as técnicas de mapeamento tridimensional delineadas na seção 2.2 sejam amplamente aceitas, elas apresentam desvantagens específicas, como a ocorrência de oclusões e lacunas na representação da realidade, resultantes, por exemplo, da posição da plataforma em relação ao objeto mapeado. No entanto, a combinação dessas técnicas pode ajudar a atenuar parte desses problemas. Para alcançar esse objetivo, recorre-se ao processo de registro (alinhamento) das nuvens de pontos geradas tanto pelo SVLT quanto pelo processo Fotogramétrico. O registro visa posicionar várias cenas com suas coordenadas locais em um único arquivo, utilizando o mesmo sistema de referência. Esse processo envolve a associação de pelo menos duas nuvens de pontos que possuam uma sobreposição de área de no mínimo 30% (GROETELAARS; AMORIM, 2011).

Para realizar o registro entre as nuvens de pontos, o algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP) é uma abordagem padrão (CHETVERIKOV; STEPANOV; KRSEK, 2005). Tal algoritmo é utilizado para ajustar a posição das nuvens de pontos e encontrar correspondências precisas entre elas. Inicialmente desenvolvido por Besl e McKay (1992), esse algoritmo parte do pressuposto de que os pontos mais próximos são correspondentes. Ele emprega uma função que minimiza a distância euclidiana entre os pontos, calculando os parâmetros de transformação (CHETVERIKOV; STEPANOV; KRSEK, 2005). Esse processo é repetido até encontrar a melhor correspondência entre as nuvens de pontos (PAVAN; SANTOS, 2015). Com isso, o ICP fixa uma nuvem de pontos como referência, ajustando a posição da outra no espaço até alcançar a máxima correspondência com os dados de referência (BESL; MCKAY, 1992).

Resumidamente, ao utilizar uma das nuvens como referência, o algoritmo ICP determina uma transformação que proporciona a melhor correspondência entre todos os pontos nas duas nuvens (PROCHAZKOVA; MARTISEK, 2018; DONG, et al., 2020). Na Figura 1 é demonstrado um exemplo de aplicação do algoritmo ICP. Na figura 1a, são apresentados dois conjuntos de dados (nuvens de pontos), configurando a situação inicial para a aplicação do ICP. Na figura 1b, é evidenciado um resultado bem-sucedido do alinhamento entre os dois conjuntos de dados, também referido como registro (PEREIRA, 2016).

Figura 1 – Processo de registro entre nuvens de pontos por ICP.

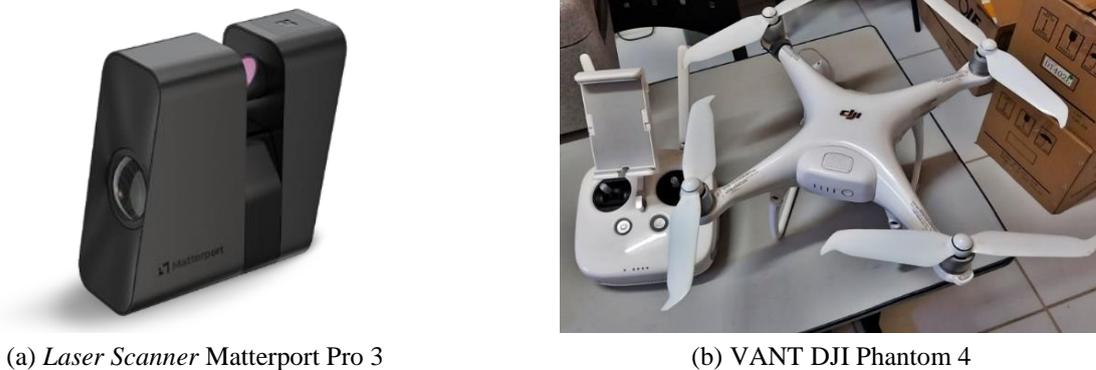


Fonte: Pereira (2016).

3 MATERIAIS

As seções 3.1 e 3.2 fornecem uma síntese das características e especificações técnicas dos equipamentos empregados na pesquisa. A primeira seção aborda as especificações e vantagens do *Laser Scanner* terrestre com a tecnologia *LiDAR*, enquanto a segunda seção detalha as características do VANT utilizado. A Figura 2 ilustra os equipamentos utilizados.

Figura 2 – Equipamentos utilizados.



(a) *Laser Scanner* Matterport Pro 3

(b) VANT DJI Phantom 4

Fonte: Guandalini (2023), Os Autores (2023).

3.1 Laser Scanner

O *Laser Scanner* Pro3 (Figura 2a) foi desenvolvido com o objetivo específico de capturar de forma abrangente as características de objetos, tanto em ambientes internos quanto externos. Ele utiliza a tecnologia *LiDAR* para garantir uma medição precisa. Com recursos de velocidade, alcance e portabilidade, o scanner é capaz de capturar com eficiência ambientes internos e externos, mesmo sob a luz solar (MATTERPORT, 2023).

A distância operacional máxima é de 100 m e mínima de 0,5 m. A resolução é de 1,5 milhões de pontos por cena, sendo a frequência de coleta de aproximadamente 100 kHz. Referente à fotografia, a resolução de saída das imagens é de 134,2 MP. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em Matterport (2023). De acordo com Pulcrano et al. (2019), em relação aos *lasers scanners* desenvolvidos pela Matterport, o sistema como um todo é gerenciado por meio de dispositivo móvel através do aplicativo *Matterport Capture*, que permite controlar toda a operação através de uma conexão *Wi-Fi* entre o *scanner* e o dispositivo. Para cada ponto de estação, o aplicativo apresenta o que foi mapeado naquele instante, permitindo analisar possíveis falhas durante o processo de levantamento, de modo a corrigi-las rapidamente.

O processamento dos dados obtidos pelo equipamento é realizado fazendo o envio das informações para o *website* da fabricante que os processa e gera os produtos finalizados que são armazenados em servidores, permitindo assim um acesso conveniente e simplificado, eliminando a necessidade de computadores robustos para o processamento dos dados reduzindo custos e tempo de processamento. Através da utilização desses dispositivos, foi viabilizada a coleta e o processamento de informações, resultando na geração de modelos 3D da região em estudo.

Alguns pesquisadores como Klapa e Mitka, (2017), Klapa, Mitka e Zygmunt (2022) vem estudando a integração de SVLT e VANT para desenvolvimento de bases cartográficas precisas para os mais variados fins e mostram que estas bases estão cada vez mais populares. E segundo os mesmos autores os modelos tridimensionais atendem os requisitos de precisão estabelecidos para a modelagem tridimensional. Segundo Abdelazeem et al. (2021), devido a alta precisão dos produtos gerados pelos SVLT, estes podem ser uma excelente fonte de dados para estudos tridimensionais.

3.2 Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)

Utilizou-se, para o mapeamento aéreo, o VANT modelo Phantom 4 (Figura 2b), desenvolvido pela marca DJI. Este modelo de drone possui características e recursos que o tornam ideal para a realização de

levantamentos aéreos e mapeamentos. O DJI Phantom 4 é um drone capaz de resistir a ventos de até 10 m/s (36 km/h), funcionando por cerca de 25 min com uma carga, além de contar com uma câmera de 12 megapixels e com campo de visada de 94° (JUNIOR; LIMA; STANGANINI, 2021; DJI, 2023).

O Phantom 4 possui um receptor/antena GPS interno e consegue georreferenciar as fotos adquiridas pela câmera. Porém, o erro de posicionamento deste sistema é relativamente grande (cerca de 5 m), o que o torna inviável para a maioria dos trabalhos de topografia. A solução é utilizar um *Global Navigation Satellite System* (GNSS), para a demarcação de pontos de controle no solo e o levantamento de suas coordenadas com a precisão adequada (PAMBOUKIAN, 2019) para posteriormente realizar o processo de fototriangulação.

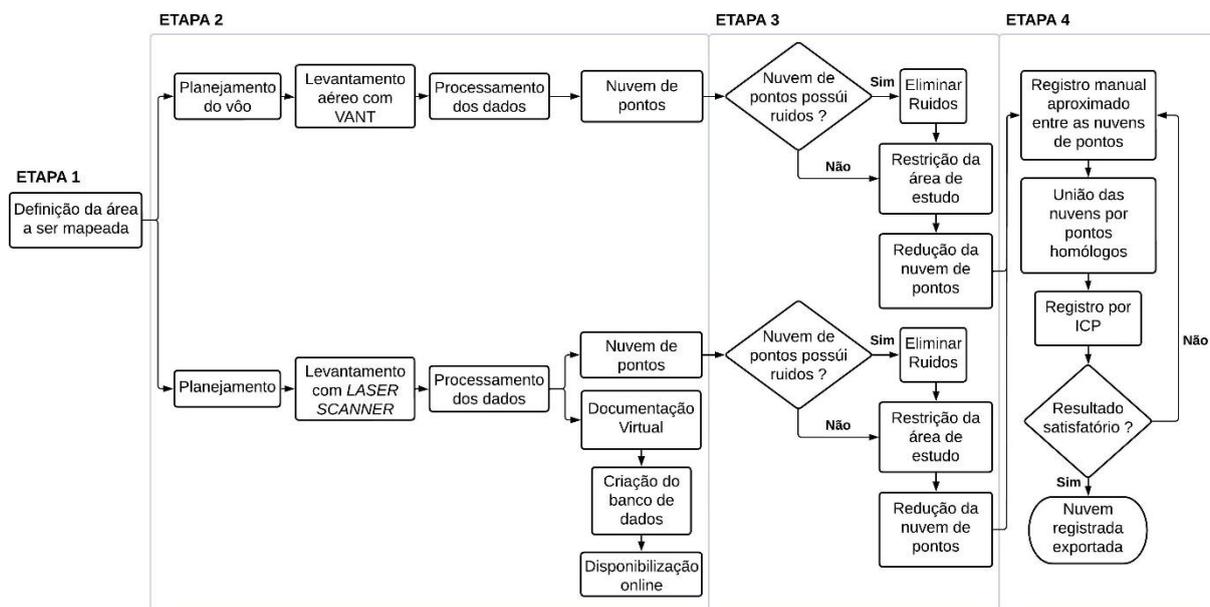
A distribuição dos pontos de apoio pré-sinalizados, foi planejada em função do plano de voo a ser executado, levando-se em consideração a área de cobertura e altura de voo. Para o plano de voo utilizou-se o *software Drone Harmony*, que automatiza o planejamento de missões em cenários desafiadores de inspeção vertical. Isso assegura uma coleta de dados de alta qualidade, onde tem-se a aquisição de dados confiável e escalonável, adaptado para atender às necessidades específicas para cada tipo de projeto (DRONE HARMONY, 2023). Neste aplicativo pode-se configurar a área de cobertura, a altura do voo, o ângulo da câmera e a porcentagem de sobreposição de imagens, além de estimar o tempo de voo e a quantidade de baterias utilizadas, entre outras coisas (PAMBOUKIAN, 2019).

O voo foi executado a aproximadamente 100 metros acima do solo. A altura de voo adotada foi definida de acordo com Brasil (2023), seguindo a resolução ICA 100/40 (Aeronaves Não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro), em que a altura máxima para voos do tipo VLOS (*Visual Line Of Sight* - operação em linha de visada visual) é de aproximadamente 120 m. Para o pós-processamento das imagens aéreas utilizou-se o *software Agisoft Metashape* que realiza o processo de correção das distorções das imagens e a fototriangulação para gerar a nuvem de pontos, assim, sendo possível obter-se os modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) (METASHAPE, 2023).

4 METODOLOGIA

Conduziu-se, o presente estudo, em quatro fases: a primeira, refere-se à definição da área a ser mapeada; a segunda, relaciona-se aos levantamentos terrestre com Laser Scanner e aéreo com VANT e tratamento dos dados coletados; a terceira consiste na restrição da área de estudo, tratamento e redução das nuvens de pontos; e, por fim, a quarta baseando-se no registro das nuvens de pontos e análise de qualidade. A Figura 3 apresenta o fluxograma do trabalho:

Figura 3 – Fluxograma da metodologia.

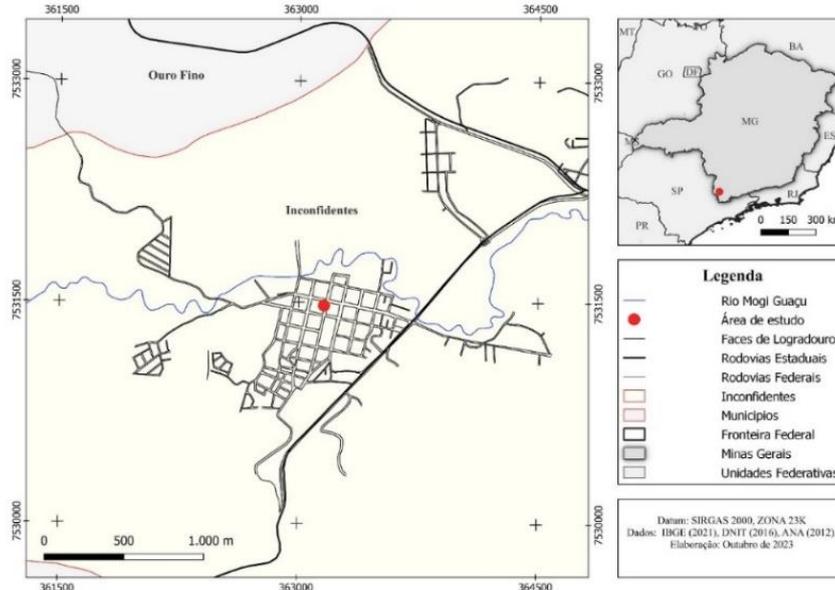


Fonte: Os autores (2023).

4.1 Definição da área a ser mapeada

A região central da cidade de Inconfidentes/MG foi selecionada como a área de estudo para os levantamentos propostos neste trabalho devido à sua relevância econômica para o município. Esta área abriga não apenas os principais estabelecimentos comerciais da cidade, mas também diversos setores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS), tornando-a um local de grande importância para o desenvolvimento econômico e educacional da região. A Figura 4 mostra a localização da região de estudo. A escolha dessa área deu-se por ser de fácil acesso, por se tratar de uma parcela pertencente ao IFSULDEMINAS. As análises realizadas nesta parcela podem ser replicadas para qualquer parcela do município.

Figura 4 – Mapa de localização.



Elaboração: Os autores (2023).

4.2 Levantamentos com *Laser Scanner* e VANT e processamento dos dados

Realizou-se, para o levantamento da região central da cidade de Inconfidentes/MG com o *Laser Scanner*, diversas varreduras de maneira sistemática, percorrendo cada ambiente e registrando imagens e informações de profundidade em diferentes pontos. O *Laser Scanner* é instalado em um tripé (Figura 5) e leva cerca de 20 segundos para capturar cada cena (360°).

Figura 5 – Procedimento em campo.



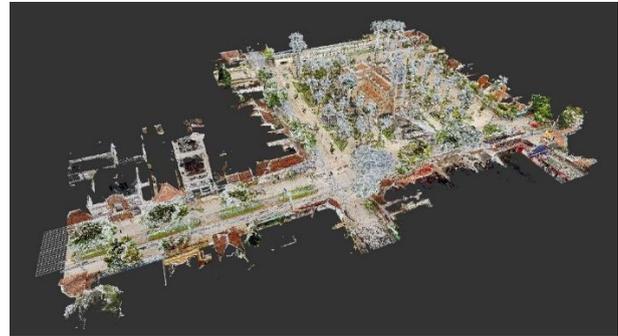
Fonte: Os autores (2023).

Após a coleta dos dados, o processamento foi realizado e como resultado, obteve-se uma nuvem de pontos densa da área capturada, além de uma documentação virtual da região central da cidade. A Figura 6 apresenta: (a) documentação virtual e (b) nuvem de pontos. A nuvem de pontos gerada pelo equipamento (Figura 6b), consiste em uma nuvem densa, expondo os objetos e características do ambiente. Esses detalhes proporcionam a representação da realidade, permitindo, dessa forma, a análise dos dados coletados.

Figura 6 – Produtos gerados pelo *Laser Scanner*.



(a) Documentação virtual

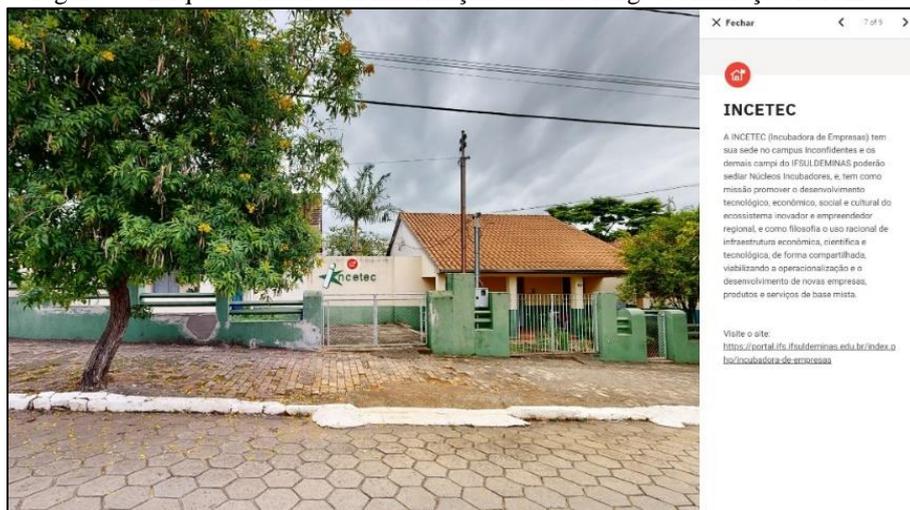


(b) Nuvem de pontos

Fonte: Os autores (2023).

A documentação virtual (Figura 6a) é um recurso que pode ser incorporado ao CTM para documentar o estado do ambiente urbano em uma data específica e pode ainda, ser disponibilizado através da rede mundial de computadores para a população. A documentação virtual gerada neste estudo pode ser acessada através do link: <https://my.matterport.com/show/?m=wkn4JBBYuaad>. Com essa plataforma, é possível incluir etiquetas virtuais com textos, imagens, vídeos, endereços eletrônicos, entre outros, com informações julgadas importantes e necessárias para o tipo de trabalho no qual o tour será utilizado, além da possibilidade de se efetuar medidas na cena, formando, desse modo um banco de dados interativo e de fácil acesso. A Figura 7 ilustra como as informações são apresentadas na documentação virtual.

Figura 7 – Etiqueta virtual com informação de texto longo e endereço eletrônico.

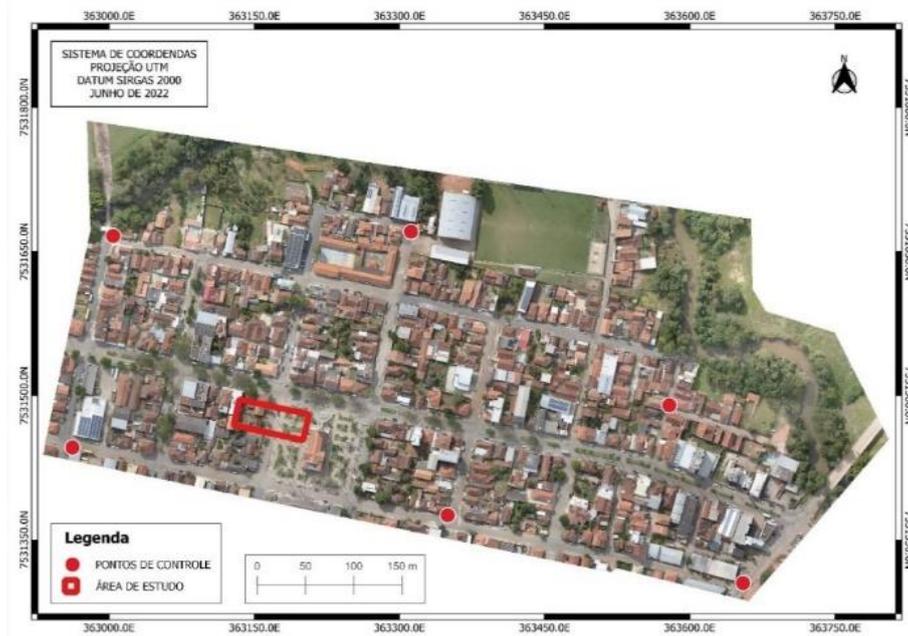


Fonte: Os autores (2023).

Conforme apresentado na Figura 3, realizou-se ainda na Etapa 2, o levantamento aéreo e tratamento dos dados. Para a correção e alinhamento das imagens, foram utilizados 7 pontos de controle pré-sinalizados, cujas coordenadas foram obtidas por receptor/antena GNSS. Ao final do levantamento, foram obtidas 167 imagens, com uma sobreposição de aproximadamente 70% e um GSD aproximado de 3,18 cm. A área total capturada pelo VANT foi de 0,29 km². Posteriormente, essas imagens foram utilizadas em processo fotogramétrico e a nuvem de pontos foi gerada por meio do *software Agisoft Metashape*. A nuvem de pontos

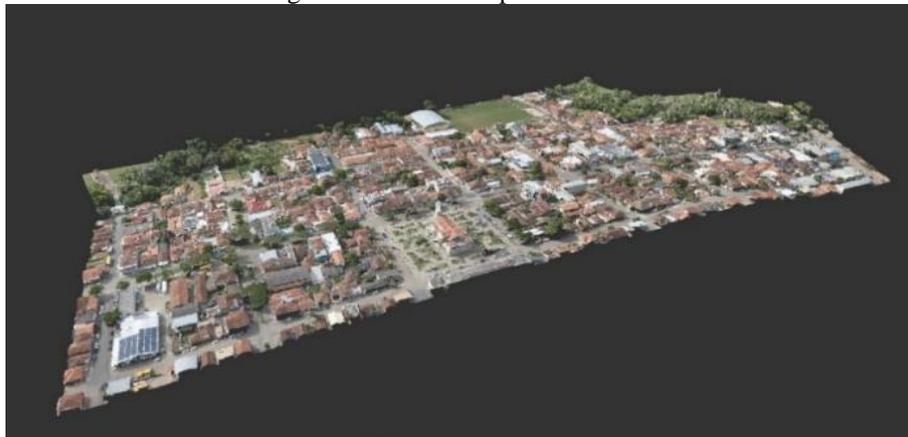
criada foi renderizada com as tonalidades obtidas das imagens originais resultando em uma representação tridimensional colorida, assim como os dados obtidos pelo *Laser scanner* apresentado anteriormente. A Figura 8 apresenta o ortofotomosaico, no qual se destaca a delimitação da área de estudo e a localização dos pontos de controle utilizados no processo de fototriangulação. Já a Figura 9 representa a nuvem de pontos resultante do processo de fototriangulação associada à correspondência densa de imagens.

Figura 8 – Ortofotomosaico georreferenciado e nuvem de Pontos VANT.



Fonte: Os autores (2023).

Figura 9 – Nuvem de pontos VANT.



Fonte: Os autores (2023).

4.3 Restrição da área de estudo, filtragem e redução das nuvens de pontos

As nuvens de pontos geradas pelo VANT e pelo *Laser Scanner* foram carregadas individualmente no *software* RECAP com a finalidade de realizar os tratamentos e reduzir as nuvens de pontos para que se enquadrassem somente na área de estudo, visando facilitar as análises. A metodologia aplicada é validada para toda a área mapeada, mas, para fins do estudo, optou-se por realizar as análises na Incubadora de Empresas Mista (INCETEC), em virtude da conveniência e da autonomia no acesso às instalações, que permitiram a condução de testes e a coleta de dados sempre que necessário.

Sendo assim, restringida a área de estudo, determinou-se a sua localização nas nuvens de pontos, priorizando designar aproximadamente o mesmo valor de área em ambas as nuvens. A Figura 10 destaca a área de estudo em cada nuvem.

Figura 10 – posição da área de estudo (INCETEC) nas nuvens de pontos.

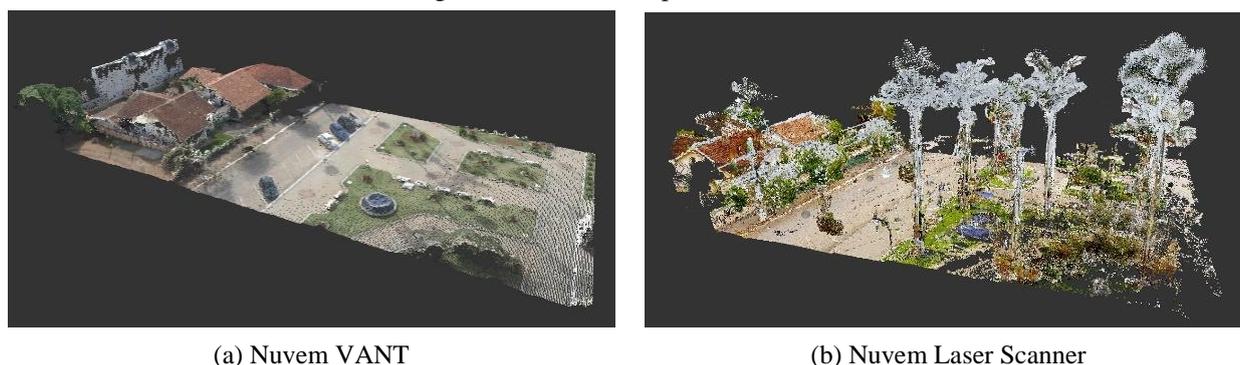


Fonte: Os autores (2023).

O processo de tratamento e redução da nuvem de pontos no *software* RECAP envolve a seleção da área de interesse e a remoção de pontos desnecessários, como aqueles que estão fora da área de estudo ou aqueles que não contêm informações relevantes para a análise pretendida. Essas operações são comumente realizadas para otimizar a nuvem de pontos, reduzindo significativamente a quantidade de pontos e o tamanho do arquivo. Incluem a filtragem, processo que permite a remoção de pontos indesejados, como obstáculos e objetos fora da área de interesse, e a reamostragem, que elimina informações sobrepostas e redundantes (GROETELAARS; DE AMORIM, 2011).

De maneira geral, as nuvens de pontos frequentemente contêm pontos considerados "ruídos", como pontos que não representam adequadamente a superfície do objeto ou da cena. Esses pontos indesejados podem ser resultado de correspondências incorretas durante o processo de geração da nuvem de pontos, variações de iluminação, obstruções parciais nas imagens ou imperfeições na captura. Para mitigar esses problemas, critérios são estabelecidos para reduzi-los (PROCHAZKOVA; MARTISEK, 2018), incluindo a aplicação de filtros de suavização para eliminar pontos isolados ou agrupamentos falsos. Além disso, algoritmos de filtragem podem ser empregados para remover pontos que se desviam significativamente da superfície esperada, com base em parâmetros como densidade local ou distâncias relativas. Ao final do processo, as nuvens de pontos reduzidas são exportadas. A Figura 11 exibe as nuvens de pontos filtradas e reduzidas.

Figura 11 – Nuvens de pontos reduzidas.



Fonte: Os autores (2023).

4.4 Registro entre as nuvens de pontos e avaliação da qualidade

O registro entre nuvens de pontos desempenha um papel crucial ao proporcionar a capacidade de ajustar pontos em um sistema de referência compartilhado. Ela se torna especialmente relevante quando os pontos em questão foram coletados por meio de um sensor em movimento (VANT) e outro estático (SVLT) (SILVA, 2015).

Segundo Souza e Amorim (2015) o primeiro passo para realizar o registro entre nuvens de pontos é

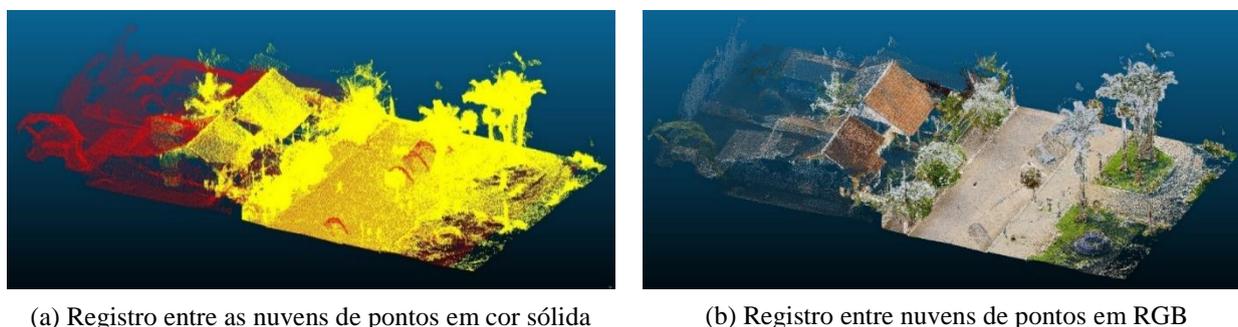
traçar estratégias para a verificação de pontos homólogos entre as nuvens. A estratégia definida neste trabalho foi localizar pontos em encontros de vértices bem definidos em ambas as nuvens, como em cumieiras dos telhados e outros locais onde as características de encontro são proeminentes. Definidas tais estratégias, no primeiro momento, foi realizado o alinhamento das nuvens de pontos pelo método de pontos homólogos, tal técnica foi empregada uma vez que o alinhamento inicial pode apresentar problemas ao utilizar o ICP (*Iterative Closest Point*) para o registro de nuvens de pontos (DONG et al., 2020) e de acordo com Ruiz et al. (2021) para o algoritmo ICP convergir, é necessário um bom alinhamento inicial e uma porcentagem de sobreposição entre as nuvens de pontos.

Para realizar este estudo, utilizou-se o *software Cloud Compare*, empregando o método ICP para alcançar um registro altamente preciso entre as nuvens de pontos do *Laser Scanner* e do VANT, que foi tomada como a referência principal. Durante a condução deste estudo, estabeleceu-se um critério de parada com um limite de 20 iterações, o qual, de acordo com as abordagens de Pribanić, Džapo e Salvi (2009), demonstrou ser suficiente para alcançar uma convergência adequada ao empregar o método ICP para fins de registro.

Levando em consideração este contexto, a Figura 12 expõe o resultado do registro entre a nuvem de pontos gerada pelo *Laser Scanner* e a nuvem obtida por meio de levantamento aéreo com VANT. Na Figura 12a, os pontos na cor vermelha são parte da nuvem do VANT, a qual foi utilizada como referência no registro. Os pontos na cor amarela são parte da nuvem do *Laser Scanner*. Pode-se notar que os espaços que sofreram oclusões na nuvem do VANT foram preenchidos por pontos da nuvem do *Laser Scanner*, bem como as partes da nuvem do *Laser Scanner* que sofreram oclusões foram suplantadas por pontos da nuvem do VANT, gerando desse modo uma nuvem de pontos mais completa.

Após a realização do alinhamento das nuvens, foi gerada uma única nuvem de pontos que representa a INCETEC em Inconfidentes/MG. Essa nuvem de pontos resultante contém informações sobre a geometria da área estudada, como por exemplo a localização e o formato dos edifícios, topografia do terreno, entre outras.

Figura 12 – Resultado do registro entre nuvens de pontos.



Fonte: Os autores (2023).

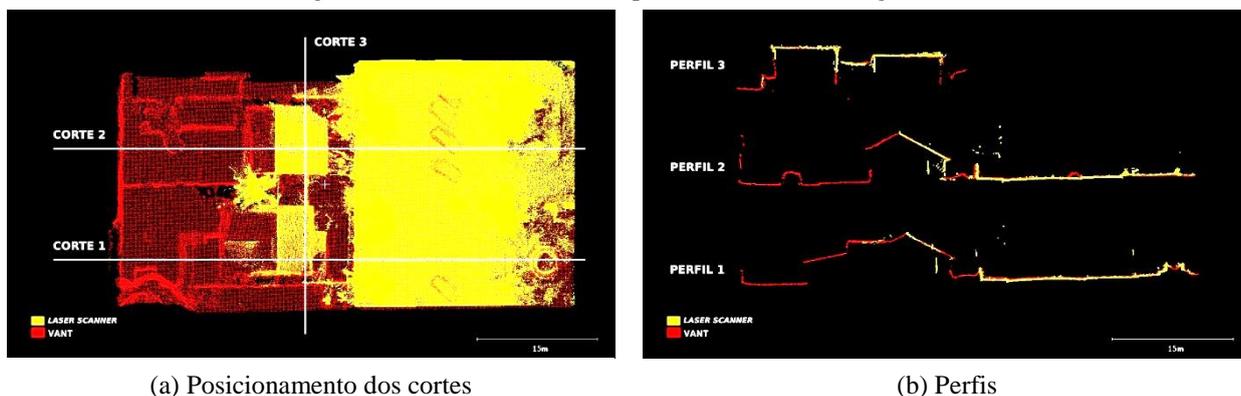
Para avaliar a eficácia da metodologia utilizada, foram conduzidas medições com um equipamento topográfico (Estação Total) na área de estudo, consideradas como referência. Tais medidas foram tomadas em alvos visíveis na cena da nuvem de pontos resultante, ao todo foram escolhidos sete alvos variados, tais como fachada, logotipo da INCETEC, padrão de energia, passagens (humana e veicular) etc. Cada uma dessas características foi medida com a Estação Total, empregando a função de distância entre dois pontos, e foram realizadas pelo menos três medições distintas para fortalecer a confiabilidade dos dados coletados.

A finalidade foi comparar com as dimensões obtidas por meio da nuvem de pontos e da documentação virtual, a fim de verificar a precisão da abordagem proposta em relação aos dados de referência obtidos pela técnica topográfica tradicional.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da avaliação dos perfis da nuvem de pontos resultante do registro, torna-se viável conduzir uma análise visual da eficácia do processo de registro. Além disso, é possível notar que a combinação de diferentes métodos de mapeamento solucionou problemas relacionados à oclusão, resultando em um mapeamento tridimensional mais abrangente e fiel à realidade. A Figura 13 destaca a representação gráfica.

Figura 13 – Perfis na nuvem de pontos resultante do registro.



(a) Posicionamento dos cortes

(b) Perfis

Fonte: Os autores (2023).

A partir da nuvem resultante do registro entre as diferentes técnicas de mapeamento 3D, os gestores podem extrair informações valiosas sobre o ambiente urbano, como a topografia, a distribuição das edificações, a infraestrutura existente e outros elementos relevantes sem a necessidade do deslocamento de recursos humanos e técnicos até o local de estudo por diversas vezes ou por longos períodos. Esses dados são fundamentais para a tomada de decisões embasadas e eficientes no planejamento urbano e na gestão municipal como um todo, pois fornecem uma representação precisa e abrangente do ambiente urbano em três dimensões. Ao combinar informações provenientes de diferentes técnicas de mapeamento tridimensional, é possível obter uma visão abrangente das características geográficas e arquitetônicas da cidade, identificando áreas de interesse, planejando o desenvolvimento urbano de forma sustentável, otimizando o uso de recursos e alocando eficazmente os serviços municipais.

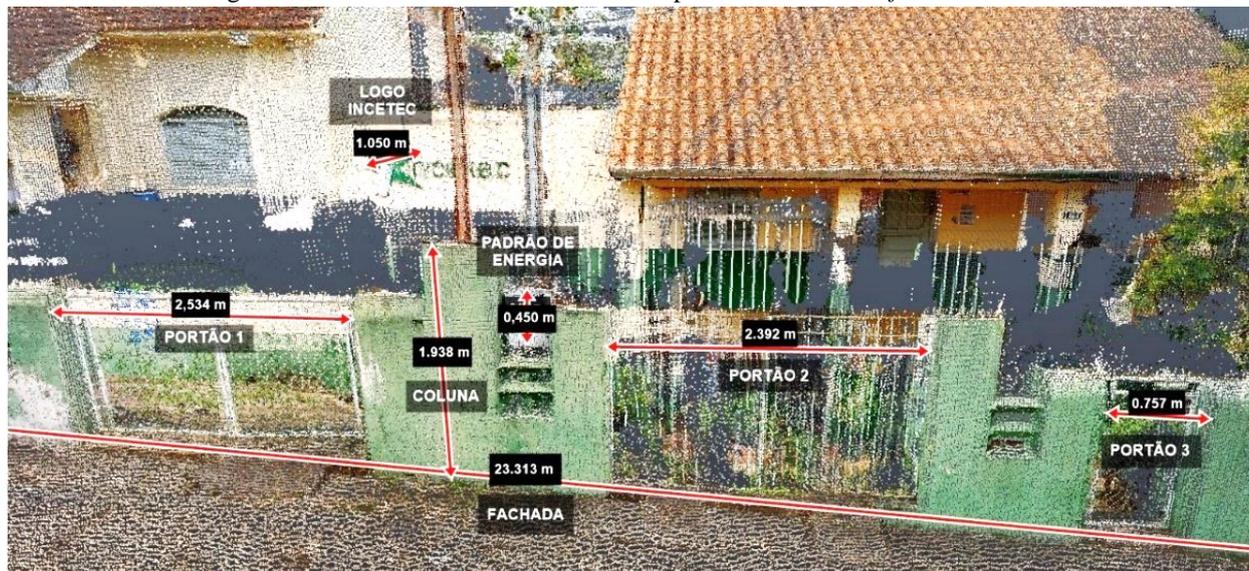
Ainda, com o objetivo de avaliar a precisão métrica fornecida pelo produto do registro, principalmente na aplicação do CTM, foram realizadas medições na fachada da INCETEC. As medidas foram feitas utilizando a ferramenta de medição disponível na documentação virtual e na nuvem de pontos resultante do registro, e comparadas com as medidas feitas por equipamento topográfico (estação total). No total, foram realizadas medições em 7 diferentes feições da fachada com cada método. As Figuras 14 e 15 apresentam as medidas realizadas na documentação virtual e na nuvem de pontos respectivamente.

Figura 14 – Medidas tomadas na documentação virtual.



Fonte: Os autores (2023).

Figura 15 – Medidas tomadas na nuvem de pontos através do *software* RECAP.



Fonte: Os autores (2023).

Para se avaliar o resultado, a Tabela 1 mostra a comparação dos valores medidos na documentação virtual (DV) e na nuvem de pontos resultante do registro (NUV) com as medidas obtidas através da estação total (ET) e a Tabela 2 evidencia os resultados dos cálculos estatísticos com as respectivas discrepâncias máximas, mínima, médias e o desvio padrão.

Tabela 1- Comparação entre medidas.

Objeto de estudo	ET (m)	DV (m)	NUV (m)	Discrepância ET/DV (m)	Discrepância ET/NUV (m)
Fachada	23,302	23,290	23,313	0,012	-0,011
Logo INCETEC	1,046	1,040	1,050	0,006	-0,004
Padrão de energia	0,453	0,460	0,450	-0,007	0,003
Portão 1	2,537	2,550	2,534	-0,013	0,003
Portão 2	2,397	2,420	2,392	-0,023	0,005
Portão 3	0,752	0,740	0,757	0,012	-0,005
Coluna	1,945	1,940	1,938	0,005	0,007

Elaboração: Os autores (2023).

Tabela 2 - Discrepâncias, média e desvio padrão.

Entre	Discrepância máxima absoluta (cm)	Discrepância mínima absoluta (cm)	Discrepância média absoluta (cm)	Desvio Padrão (cm)
ET/DV	2,3	0,5	1,1	1,3
ET/NUV	1,1	0,3	0,5	0,6

Elaboração: Os autores (2023).

Ao realizar-se uma análise numérica dos resultados apresentados na Tabela 2, é possível observar que a discrepância entre a estação total e a nuvem de pontos resultante do registro é de aproximadamente 1 cm, enquanto a discrepância entre a estação total e a documentação virtual é aproximadamente o dobro desse valor. As médias obtidas foram de 0,5 cm entre estação total e a nuvem de pontos e 1,1 cm entre a estação total e a documentação virtual. A qualidade dos resultados pode ser avaliada com base nos desvios-padrão entre a estação total e a nuvem de pontos e entre a estação total e a documentação virtual, os quais são respectivamente de 0,6 cm e 1,3 cm, destacando o erro menor quando se utiliza a nuvem em vez da documentação virtual.

É importante destacar que parte da discrepância pode ser atribuída ao erro de pontaria presente no processo de seleção de pontos tanto na documentação virtual quanto no *software* de gerenciamento de nuvens de pontos. Esse tipo de erro é comum em representações tridimensionais e pode resultar em medidas

ligeiramente diferentes da mais fiel a realidade, obtida por meio da estação total.

O fato de a documentação virtual ter apresentado uma discrepância maior quando comparado a nuvem de pontos se deve ao fato de que não é possível se obter um ponto de vista diferente do que o pré-definido, uma vez que este depende da posição em que o equipamento foi estacionado para tomada da cena, desse modo, o erro de pontaria tende a ser maior, visto que em certos lugares a visualização do alvo é dificultada. Em contrapartida, na nuvem de pontos, a movimentação pela cena é livre, e assim, o erro de pontaria se torna menor.

Considerando que o desvio padrão foi de 0,6 cm para nuvem de pontos e 1,3 cm para a documentação virtual, e ainda que a discrepância máxima foi de 1,1 cm na documentação virtual, infere-se que o mapeamento se encontra de acordo com as normas atualmente estabelecidas. A portaria 3242/2022, de forma geral, aborda sobre as coordenadas dos vértices limitantes das parcelas serem precisas utilizando-se de normas específicas, porém, sabe-se que o Brasil não tem uma legislação aprovada para mapeamento tridimensional, o que dificulta as análises. Uma normativa recente aprovada foi a NBR 17047/22, onde a precisão para os pontos que definem os limites de parcelas territoriais não deve ser superior a 8 centímetros, e que a medição da distância entre dois vértices, com base nas distâncias calculadas a partir das coordenadas, possui uma tolerância máxima de 24 centímetros. Portanto, mesmo com o erro de pontaria, as diferenças encontradas são consideradas pequenas (Tabela 2) e suficientes para atender à maioria dos trabalhos, inclusive os relacionados ao CTM.

Para Afonso, Araujo e Nóbrega (2013) o aprimoramento das ferramentas administrativas é uma maneira de potencializar a arrecadação do IPTU, além de garantir que sua cobrança seja justa e imparcial. Ao mesmo tempo, pode ser estabelecido para finalidades fiscais (por exemplo, avaliação e tributação), legais (por exemplo, transferências e certidões), administrativas (por exemplo, planejamento e controle do uso da terra), bem como disponibilizar informações para o desenvolvimento sustentável e a proteção ambiental, tendo como base o cadastro territorial (AMORIM; PELEGRINA; JULIÃO, 2018). Estas características da parcela podem ser facilmente constatadas através da documentação virtual juntamente ao banco de dados, desde que o mapeamento seja atualizado sistematicamente.

Em síntese, o registro entre as nuvens de pontos geradas por diferentes equipamentos amplia as possibilidades de aplicação desta metodologia. No caso do presente estudo, a integração das nuvens de pontos geradas pelo VANT e pelo *Laser Scanner* permitiu a geração de uma nuvem de pontos única mais precisa e detalhada. Somado a isso, a documentação virtual pode ser útil a diversas aplicações, sejam elas técnicas ou apenas informativas. Portanto, o estudo aqui apresentado pode contribuir significativamente com as prefeituras para a realização do Cadastro Territorial Multifinalitário.

6 CONCLUSÃO

Com a necessidade de os municípios terem uma melhor gestão territorial devido a complexibilidade dos centros urbanos, associado a uma crescente procura de observações e dados tridimensionais das parcelas e edificações, facilitado pelas plataformas de baixo custo com tecnologias de mapeamento 3D, fica evidente a transição do CTM bidimensional para o tridimensional.

O experimento aqui desenvolvido mostra as potencialidades de geração de um CTM tridimensional, apoiando os gestores municipais na gestão territorial do município. A base cartográfica elaborada pela metodologia aplicada está de acordo com as precisões das portarias e normas estabelecidas no Brasil, porém há carência de uma legislação específica para o CTM tridimensional. A nuvem de pontos resultante do alinhamento e registro de duas outras nuvens de pontos distintas, sendo a primeira obtida por levantamento aéreo por meio de VANT e a segunda gerada por *Laser Scanner*, incorpora as melhores características de cada método de levantamento, minimizando oclusões.

Em relação a verificação da precisão, a Tabela 1 apresenta algumas medidas comparativas entre a técnica de mapeamento proposta e as medias realizada *in loco*, e pode-se verificar que têm valores baixos. Na Tabela 2, visualiza-se que o erro máximo obtido na medida foi de 2,3 cm na documentação virtual. Vale destacar que a nuvem de pontos se mostrou mais precisa em relação a documentação virtual devido a aspectos relacionados a liberdade dos movimentos pelas cenas e o erro de pontaria. Entretanto, avalia-se que a documentação virtual, ainda assim, possui potencialidade de ser empregados pelas prefeituras com o intuito

de realizar o CTM, bem como a nuvem de pontos resultante do registro.

Todavia, a técnica de mapeamento sugerida apresenta certos aspectos negativos. A nuvem de pontos gerada pelo *Laser Scanner* é significativamente mais densa que a nuvem gerada por VANT e possui distinções significativas, o que pode dificultar o alinhamento entre ambas as nuvens. Ademais o mapeamento deve ser realizado com o menor fluxo possível de pessoas e principalmente de veículos, uma vez que estes podem ocultar áreas que possam vir a ser importantes futuramente.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IFSULDEMINAS e a Guandalini Posicionamento pelo empréstimo dos equipamentos e softwares utilizados. O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Bolsa à Iniciação Científica e Tecnológica Institucional (PIBIC) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG)

Contribuição dos Autores

E.M.G., F.L.A. e H.C.O. contribuíram em todas as etapas, de Conceptualização à Redação – revisão e edição. J.C.B.R. contribuiu nas etapas de Administração do projeto, Recursos, Software, Supervisão e Validação.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há nenhum conflito de interesse.

Referências

- ABDELAZEEM, M., ELAMIN. A.; AFIFI A. A.; EL-RABBANY. 2021. Multisensor point cloud data fusion for precise 3D mapping. **Egypt. J. Remote. Sens. Space Sci.**, 24(3), 835–844. DOI: 10.1016/j.ejrs.2021.06.002.
- ABNT. **NBR 17047/22**: Levantamento cadastral territorial para registro público – Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.
- AFONSO, J. R. R.; ARAUJO, E. A.; NÓBREGA, M. A. R. IPTU no Brasil: um diagnóstico abrangente. **FGV Projetos**, 2013. 79 p. Disponível em: <http://fgvprojetos.fgv.br/sites/fgvprojetos.fgv.br/files/iptu_no_brasil_um_diagnostico_abrangente_0.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2023.
- AIEN, A.; RAJABIFARD, A.; KALANTARI, M.; WILLIAMSON, I. P. Aspects of 3D Cadastre- A Case Study in Victoria. **FIG Working Week**. 2011, Marrakech, Morocco.
- AMORIM, A; PELEGRINA, M. A.; JULIÃO, R P. **Cadastro e gestão territorial: uma visão luso-brasileira para a implementação de sistemas de informação cadastral nos municípios**. 2018. ISBN: 978-85-9546-282-3 (eBook).
- ARAÚJO, A. L. **Cadastro 3D no Brasil a partir de varredura a laser (laser scanning)**. 2015. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2015.
- BECKER, J. H.; CENTENO, J. A. S. Pré-alinhamento e registro de nuvens de pontos obtidas com uma câmera de distância pmd camcube 3. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 68, n. 7, 2016. DOI: 10.14393/rbcv68n7-44362. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44362>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- BESL, P. J.; MCKAY, N. D. A method for registration of 3D shapes. **IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence**, v. 14, n. 2, p. 239- 256, fev. 1992. <http://dx.doi.org/10.1109/34.121791>.
- BRASIL. **Comando da Aeronáutica**. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Aeronaves Não Tripuladas

- e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. ICA 100-40. Rio de Janeiro, 2023.
- BRASIL. **Ministério do Estado das Cidades**. Portaria Ministerial 511/2009. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/portaria-511-2009_217279.html. Acesso em: 7 nov. 2023.
- BRASIL. **Ministério da Justiça e Segurança Pública**. Portaria nº 3.242, de 9 de novembro de 2022. Diário Oficial da União, <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-3.242-de-9-de-novembro-de-2022-443240087>, publicado em 9 de novembro de 2022. Acesso em: 29 out. 2023.
- BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento Regional**. Portaria MDR nº 3.242, de 9 de novembro de 2022. Diretrizes para a criação, a instituição e a atualização do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) nos municípios brasileiros. Diário Oficial da União, Brasília, DF, nov. 2022. Seção 1.
- ÇAGDAS, V.; STUBKJÆR, E. Design research for cadastral systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, Maryland Heights, 2010. 77-87. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.003
- CARNEIRO, A. F. T. **Cadastro Imobiliário e Registro de Imóveis**. IRIB, Instituto de Registro Imobiliário no Brasil. Ed. safE. Porto Alegre – RS. 2003.272 p.
- CARNEIRO, A. F. T.; ERBA, D. A.; AUGUSTO, E. A. A. Cadastro multifinalitário 3D: conceitos e perspectivas de implantação no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 64, n. 2, 2012. DOI: 10.14393/rbcv64n2-43791. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43791>. Acesso em: 6 nov. 2023.
- CHEKVERIKOV, D.; STEPANOV, D.; KRSEK, P. Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm. **Image and vision computing**, v. 23, n. 3, p. 299-309, 2005.
- COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Vol. 181. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007, 196 p.
- COSTA, D. C. **Diretrizes para elaboração e uso de bases cartográficas no planejamento municipal: urbano, rural e transportes**. 2001. 126 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2001.
- SOUZA, G. H. B.; AMORIM, A. Parcelas espaciais e nuvem de pontos: viabilidade e possibilidades de integração de dados para o cadastro 3D. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 67, n. 2, 2015. DOI: 10.14393/rbcv67n2-44665. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44665>. Acesso em: 6 nov. 2023.
- DJI. **Phantom 4**. Disponível em: <<https://www.dji.com/br/phantom-4>>. Acesso em: 18 jun. 2023.
- DONG, Z.; LIANG, F.; YANG, B.; XU, Y.; ZHANG, Y.; LI, J.; WANG, Y.; DAI, W.; FAN, H.; HYYPPA, J.; STILLA, U. Registration of Large-scale Terrestrial Laser Scanner Point Clouds: A Review and Benchmark. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 163, p.327–342, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013>.
- DRONE HARMONY. Disponível em: <<https://droneharmony.com/>>. Acesso em: 28 jul. 2023.
- ELBERINK, S. O. Acquisition of 3D topography. Automated 3D road and building reconstruction using airborne laser scanner data and topographic maps. Delft, 2010. 194 p. ISBN: 978 90 6132 318 1.
- ENGMAN, H. Web-based 3D in Urban Planning. **GIM International**, 2016.
- ESTEIO. **Mapeamento para SIG para PM de Uberlândia-MG**. Disponível em: <<https://www.esteio.com.br/executados/sig/uberlandia/>>. Acesso em: 07 mar. 2023.
- FONSECA, B. M.; MOURA, A. C. M.; RIBAS, R. P.; CARVALHO, G. A.; CASAGRANDE, P. B.; Modelagem paramétrica da paisagem urbana e cadastro 3D utilizando dados lidar: Uma proposta metodológica. UFMG & UFSC, 2016.
- GARCIA, R. C. O que é preciso saber sobre CADASTRO TERRITORIAL MULTIFINALITÁRIO. 1. ed. Brasília-DF e Rio de Janeiro-R: Caixa Econômica Federal e IBAM, 2007. v. 01. 48p.
- GUADALUPE D. C., CASAGRANDE P. B., OLIVEIRA D. S. C., URBANO C., VON SPERLING F. C., MOREIRA C. T., BRECK G. F. Anais. XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva 6 a 9 de novembro de 2017, SBC, Rio de Janeiro - RJ, p. 1001-1005.
- GUANDALINI BR. **Matterport Pro3**. Disponível em: <<https://www.guandalinibr.com/matterport-pro3/>>. Acesso em: 1 jun. 2023.
- GROETELAARS, N. J.; DE AMORIM, A. L. Tecnologia 3D Laser Scanning: características, processos e ferramentas para manipulação de nuvens de pontos. In: **XV Congresso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital-SIGRADI**. Santa Fé: Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo da Universidad Nacional del Litoral. 2011. p. 1-5.

- INSTITUTO DE TERRAS E CARTOGRAFIA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (ITERJ). **Sistema de Informações Geográficas do ITERJ**. Disponível em: http://www.iterj.rj.gov.br/iterj_site/sig-iterj. Acesso em: 31 out. 2023.
- JUNIOR, M. K.; LIMA, E. M.; STANGANINI, F. N. Utilização de Aeronaves Remotamente Pilotadas no Processo de Mapeamento e de Regularização Fundiária no Interior de São Paulo: Loteamento Vila Nova Trieste. **Simpósio nacional de gestão e engenharia urbana**, v. 3, p. 547-557, 2021.
- KLAPA, P., MITKA B. 2017. Application of terrestrial laser scanning to the development and updating of the base map. **Geod. Cartogr.**, 66 (1), 59–71. DOI: 10.1515/geocart-2017-0002.
- KLAPA, P.; MITKA, B.; ZYGMUNT, M.. Integration of TLS and UAV data for the generation of a three-dimensional basemap. **Advances in Geodesy and Geoinformation**, p. e27-e27, 2022.
- LAZZAROTO, D. R. **Avaliação da qualidade de base cartográfica por meio de indicadores e sistema de interferência fuzzy**. 2005. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- LESLAR, M. Integrating Terrestrial LiDAR with Point Clouds Created from Unmanned Aerial Vehicle Imagery. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, n. 1, p. 97–101. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-97-2015.
- LILLESAND, T.; KIEFER, R. Remote sensing and image interpretation. 4 ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2000.
- MARTINS, M. A. R.; MITISHITA, E. A.; ANTONIO, N. D. Estudo da Integração de Nuvens de Pontos entre Conjunto de Dados baseado em VANT e Levantamento Aéreo LiDAR. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 4, p. 789–804, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n4-64225. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/64225>. Acesso em: 8 mar. 2023.
- MATTERPORT. **About Us**. Disponível em: <https://matterport.com/about-us>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- MATTERPORT. **Matterport Pro3 Technical Specifications**. Disponível em: https://support.matterport.com/s/article/Pro3TechnicalSpecifications?language=en_US >. Acesso em: 8 mar. 2023.
- MATTERPORT. **Pro3**. Disponível em: <https://matterport.com/pro3>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- METASHAPE. **Agisoft Metashape**. Disponível em: https://www.metashape-la.com/pt/comeco/?utm_source=Google&gclid=CjwKCAjwzo2mBhAUEiwAf7wjkkFzCNrMe5mY1cUZDv9rePNvFsUHLwx0vZx1Ifc_p1PtWGrHqbw64RoC-ywQAvD_BwE>. Acesso em: 28 jul. 2023.
- OLIVEIRA, F. H.; FERREIRA, B.; DE FARIAS, J. L. P. O estado da arte do cadastro 3D no Brasil e no mundo. In: COBRAC 2018. 2018.
- OLIVEIRA, H. C. **Deteção de áreas de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira utilizando dados LASER**. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013.
- PAIXÃO, S. K. S.; NICHOLS, S.; CARNEIRO, A. F.T. Cadastro Territorial Multifinalitário: dados e problemas de implementação do convencional ao 3D e 4D. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 3-21, mar. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702012000100001>
- PAMBOUKIAN, S. V. D.; **Topografia com Drones e GNSS**. In: MOSTRA DOCENTES DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DA ESCOLA DE ENGENHARIA, UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE, 2019. Disponível em: https://www.mackenzie.br/fileadmin/ARQUIVOS/Public/1mackenzie/universidade/laboratorios/labgeo/2019/Trabalhos/TOPOGRAFIA_COM_DRONES_E_GNSS.pdf> Acesso em: 10 ago. 2023.
- PAVAN, N. L.; SANTOS, D. R. Um Método Automático para Registro de Dados Laser Scanning Terrestre usando Superfícies Planas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba/PR, v. 21, n. 3, p. 572-589, 2015/set. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000300032>
- PEREIRA, C. C. **A importância do Cadastro Territorial Multifinalitário para elaboração de planos diretores**. 2009. 207 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Programa de pós-graduação em engenharia civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC, 2009.
- PEREIRA, N. S. **Cloud Partitioning Iterative Closest Point (CP-ICP): um estudo comparativo para registro de nuvens de pontos 3D**. 2016. 35f. Dissertação (mestrado em engenharia de teleinformática) –

- Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de PósGraduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2016.
- PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Portal GeoSampa Mapa**. Disponível em: <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx>. Acesso em: 07 mar. 2023
- PRIBANIĆ, T.; DŽAPO, H.; SALVI, J. Efficient and Low-Cost 3D Structured Light System Based on a Modified Number-Theoretic Approach. **Journal on Advances in Signal Processing**, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/474389>.
- PROCHAZKOVA, J.; MARTISEK, D. Notes on iterative closest point algorithm. In: CONFERENCE ON APPLIED MATHEMATICS APLIMAT. 2018. Bratislava. **Anais [...]**. Bratislava: 17th Conference on Applied Mathematics APLIMAT 2018.
- PULCRANO, M.; SCANDURA, S.; MININ, G.; LUGGO, A. 3D cameras acquisitions for the documentation of cultural heritage. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Bergamo, Italia. v.42, 639-646, 2019.
- REMONDINO, F.; EL-HAKIM, S. **Imagebased 3d Modeling: A Review. The Photogrammetric Record**, V. 21, N. 115, P. 269-291, Set. 2006.
- RUIZ, P. R. S.; ALMEIDA, C. M.; SCHIMALSKI, M. B.; RENNÓ, C. D.; MITISHITA, E. A.; LIESENBERG, V. Avaliação do Desempenho dos Métodos ICP, CPD e SVR para Registro Automático de Nuvens de Pontos Relativas a Telhados Extraídas de Dados LiDAR Aerotransportados. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 73, n. 3, p. 885–910, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n3-57838.
- SHAN, J.; TOOTH, C. Topographic LASER ranging and scanning: principles and processing. 1° ed. Boca Raton: **CRC Press**, 2009. <https://doi.org/10.1201/9781420051438>
- SILVA, B. M. F. **Registro global de nuvens de pontos RGB-D em tempo real usando fluxo óptico e marcadores**. 2015. 108f.. Tese (Doutorado em Engenharia de Computação) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2015.
- SOUZA, D. V.; COSTA, D. C.; ROCCO, J.; TRABANCO, J. L. A.; OLIVEIRA, H. C. Cadastro Urbano: uma Proposta para Codificação de Parcela Territorial Urbana com Abrangência Nacional. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 4, p. 839–858, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n4-64008.
- SOUZA, I. R. **Avaliação de ortomagens geradas por aeronaves remotamente pilotadas para uso no Cadastro Territorial Multifinalitário de pequenas cidades**. 51 p., Monografia (Bacharelado em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica) - Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia – MG, 2019.
- STOTER, J. E. 2004. 3D cadastre. Delft: NCG, Netherlands Geodetic Commission.
- TOMMASELLI, A. M. G.; SILVA, J. F. C.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M.; DAL POZ, A. P. Fotogrametria: aplicações a curta distância. In: MENEGUETE Jr, M.; ALVES, N. (Organizadores), **FCT 40 anos, Perfil Científico – Educacional**, Presidente Prudente SP, p. 147-159, 1999.
- VIEIRA, C. A. O.; OLIVEIRA, J. A.; SILVA, M. C. Sistema de Informação Cadastral para Cidades de Médio e Grande Porte. In: 5° COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Territorial Multifinalitário, 2002, Florianópolis - SC. **Anais do 5° COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Territorial Multifinalitário**. Florianópolis – SC: Univesidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- VICENTIN, R. C. **Criação de nuvens de pontos a partir da fotogrametria: Análise de sensibilidade**. 2021. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação) - Instituto Politécnico de Viseu, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu – Portugal, 2021.
- VOSSelman, G.; MAAS, H. Airborne and terrestrial laser scanning. 1ª ed. Boca Raton: **CRC press**, 2010.
- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning — an introduction and overview. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 68-82, 1999.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of Fotogrammetry: with Application in GIS**. 3ª Edição. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 2004.
- WUTKE, J. D. **Métodos para avaliação de um sistema LASER scanner terrestre**. 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2006. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/5958>.

Biografia do autor principal



Enrico Moreira Gonçalves, brasileiro, natural de Cruzília/MG. Graduando em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica pelo Instituto Federal do Sul de Minas Gerais – Campus Inconfidentes/MG (2019-2025).



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.